Research Paper

Genetic Environments of Au-Ag-bearing Gasado Hydrothermal Vein Deposit

Youngjin Ko¹, Chang Seong Kim², Sang-Hoon Choi^{3,*}¹Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp., Wonju, 26464, Korea²PrimoResource Ltd., Goyang, 10564, Korea³Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

*Corresponding author : cshoon@cbnu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 19 February 2022
 Received in revised form 23 February 2022
 Manuscript accepted 23 February 2022
 Available online 28 February 2022

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2022.55.1.53>

Research Highlights

- The Gasado hydrothermal Au-Ag vein deposit formed by narrow open space filling along subparallel fractures in the late Cretaceous volcanoclastic sedimentary rock.
- Au-Ag mineralization of the deposit occurred at temperatures of $\geq 290^{\circ}\text{C}$ to $\leq 130^{\circ}\text{C}$ from fluids (fugacity of sulfur: $\approx 10^{-10.1}$ to $\leq 10^{-18.5}$ atm) whose chemistry changed rapidly as a result of cooling.
- The deposit may represent an epithermal Au-Ag deposit which was formed near paleo-surface.

ABSTRACT

The Gasado Au-Ag deposit is located within the south-western margin of the Hanam-Jindo basin. The geology of the Gasado is composed of the late Cretaceous volcanoclastic sedimentary rocks and acidic or intermediate igneous rocks. Within the deposit area, there are a number of hydrothermal quartz and calcite veins, formed by narrow open space filling along subparallel fractures in the late Cretaceous volcanoclastic sedimentary rock. Vein mineralization at the Gasado is characterized by several textural varieties such as chalcedony, drusy, comb, bladed, crustiform and colloform. The textures have been used as exploring indicators of the epithermal deposit. Mineral paragenesis can be divided into two stages (stage I, ore-bearing quartz veins; stage II, barren carbonate veins) considering major tectonic fracturing event. Stage I, at which the precipitation of Au-Ag bearing minerals occurred, is further divided into three substages (early, middle and late) with paragenetic time based on minor fractures and discernible mineral assemblages: early, marked by deposition of pyrite and pyrrhotite with minor chalcocopyrite, sphalerite and electrum; middle, characterized by introduction of electrum and base-metal sulfides with minor argentite; late, marked by argentite and native silver.

Au-Ag-bearing mineralization at the Gasado deposit occurred under the condition between initial high temperatures ($\geq 290^{\circ}\text{C}$) and later lower temperatures ($\leq 130^{\circ}\text{C}$). Changes in stage I vein mineralogy reflect decreasing temperature and fugacity of sulfur ($\approx 10^{-10.1}$ to $\leq 10^{-18.5}$ atm) by evolution of the Gasado hydrothermal system with increasing paragenetic time. The Gasado deposit may represents an epithermal gold-silver deposit which was formed near paleo-surface.

Keywords: Gasado, Au-Ag, electrum, epithermal, vein deposit

Citation: Ko, Y., Kim, C.S., Choi, S.-H. (2022) Genetic Environments of Au-Ag-bearing Gasado Hydrothermal Vein Deposit. Korea Economic and Environmental Geology, v.55, p.53-61, doi:10.9719/EEG2022.55.1.53.

✂ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.
 pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2022 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

함 금-은 가사도 열수 맥상광상의 성인

고영진¹ · 김창성² · 최상훈^{3,*}

¹한국광해광업공단

²프리모리소스

³충북대학교 지구환경과학과

*책임저자 : cshoon@cbnu.ac.kr

요 약

가사도광상은 옥천대 남서부 해남-진도분지의 남서익부에 위치하며 백악기 후기 유천층군에 대비되는 화산쇄설성 퇴적암류 내에 발달한 열극을 충전하여 생성된 함 금-은 열수 맥상광상으로, 각력상 및 정동조직과 함께 부분적인 미정질조직, 빗살조직, 블레디드조직, 호상조직, 칼세도니조직 및 콜로폼조직 등 천열수광상의 조직 특성을 보여준다. 가사도광상의 맥상 광화작용은 구조운동에 의하여 광화 I기와 광화 II기로 구분된다. 광화 I기는 금-은 광화작용이 진행된 주 광화시기로, 석영맥 내에 주된 함 금-은 광물인 에렉트럼과 함께 황화광물 및 함 은 광물 등이 산출한다. 광화 II기는 주 광화작용 이후 급속 광화작용이 이루어지지 않은 방해석맥의 생성 시기이다. 광화 I기는 광물의 공생관계와 산출하는 광물 조합 특성 등에 의하여 3개의 세부 광화시기(초기, 중기, 후기)로 구분된다. 광화 I기의 초기에는 황철석, 자류철석의 산출로 시작되어 소량의 황동석, 섬아연석 및 에렉트럼을 수반하여 산출한다. 광화 I기 중기는 주된 함 금-은 광화작용이 광화 I기의 초기 말부터 계속하여 진행된 시기이다. 주로 에렉트럼과 함께 황동석, 섬아연석, 방연석 등이 함 은 광물인 휘은석 등을 수반하여 산출한다. 광화 I기 후기는 휘은석과 자연은의 주된 생성 시기이다.

가사도광상 함 금-은 광화작용은 약 $290 \sim \leq 130^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건에서 열수계의 냉각작용에 의해 진행되었으며, 이때의 황 분압 조건은 $\approx 10^{-10.1} \sim \leq 10^{-18.5} \text{ atm}$ 이었다. 함 금-은 가사도광상은 광상·광물학적 특성, 지화학적 환경변화 및 광화작용의 온도 조건 등으로 미루어 천부 환경에서 생성된 천열수 맥상광상이다.

주요어 : 가사도, 금-은, 에렉트럼, 천열수, 맥상광상

1. 서 론

금, 은의 매장량은, 전 세계적으로 다른 금속자원들에 비해 정확하게 보고되어 있지 않으나, 각각 약 5만톤, 56만톤으로 추정된다(James, F. R. II., 2020). 금, 은은 예로부터 통화 결제 수단으로서 화폐금속의 역할과 장식용 등으로 많이 사용되어왔으며 최근에는 치과용과 전기·전자공업용 등의 재료로 사용되는 등 활용도가 다양하여 인류에게 필수적인 매우 중요한 금속자원 중 하나이다.

세계적으로 주요 금·은 광상 유형으로는 열수광상, 반암형광상 및 사광상 등이 있으며, 중국, 호주 및 멕시코 등이 대표적인 생산 국가이다(James, F. R. II., 2020). 국내에 부존하는 금·은 광상 유형으로는 스카른형 광상, 알라스카이트형 광상, 열수교대형 광상, 열극충진형 맥상광상 및 충적형 사금광상 등으로 분류되지만, 대부분은 열극충진형 맥상광상에 속한다.

국내의 열극충진형 금·은 맥상광상은 지체구조상 선캄브리아시대 경기육괴 및 영남육괴, 고생대 태백산분지와

옥천변성대, 중생대 쥐라기 대보조산운동에 의한 대규모 심성암체 및 백악기 퇴적암, 불국사 화성활동과 관련된 화산암-반심성암의 복합체 등 다양한 모암에 배태되어 상이한 지질조건에서 형성되었으나, 광화시기는 주로 중생대의 대보 및 불국사 화성활동과 매우 밀접하게 관련되어 있다(Choi et al., 2001, 2006).

상기 화성활동과 관련된 관입암체의 관입 심도는 광산마다 상당한 차이를 보이나, 일반적으로 쥐라기 관입암체의 정체 심도는 $\geq 5\text{km}$, 백악기 관입암체의 정체 심도는 $\leq 2 \sim 3\text{km}$ 로 보고된 바 있다(Tsuei et al., 1981; Cho and Kwon, 1994). 화성활동 시기에 따른 관입 정체 심도의 차이와 더불어 광화유체의 생성환경에 기인하는 지질학적 환경이 광산마다 다양하여 금·은의 침전환경 등의 차이를 나타내고 있어 상이한 유형의 광상이 배태되고 있다(Choi, 1999; Choi et al., 2001).

가사도광상은 전라남도 진도군 조도면 가사도의 남부 지역에 위치하며, Ivanhoe Mines에 의해 1995년에 지표조사가 수행되었으며, 1999년부터 2003년까지 대한광업

진흥공사에 의해 정밀조사, 탐광시추 등 지속적인 탐광 작업이 수행된 바 있다(Sennitt, 1995; Kang, 1998; Lee et al., 2000). 이를 바탕으로 2015년부터 주맥을 대상으로 0ML에서 -73ML까지 총 6개 편을 개설하여 현재까지 개발하고 있다. 2016년부터 생산을 개시했으며, 광산에서 제출한 광물생산보고서에 의하면 금은 금 99.9%를 기준으로 2016년 77kg, 2017년 173kg, 2018년 145kg, 2019년에 118kg를 생산했으며, 은은 은 99.9%를 기준으로 2016년 2,734kg, 2017년 5,695kg, 2018년 4,065kg, 2019년 3,423kg를 생산한 것으로 확인된다.

본 연구는 가사도 금-은 광상의 주맥 광화작용과 관련된 광석광물의 산출상태, 광물학적 특성, 광물의 공생관계 및 열역학적 자료에 근거한 광석광물의 침전환경 등을 밝히고, 이를 근거로 광상 생성 시의 지배적인 물리·화학적 요인과 부존 특성 등을 규명하여 추가 탐사 및 개발 등에 활용 가능한 광상학적 지침자료를 제시하고자 한다.

2. 지질개요

가사도광상은 북동-남서 방향으로 연장성을 갖는 영동-광주 단층계를 따라 발달 된 옥천대 남서부 해남-진도분지의 서편에 위치한다(Fig. 1). 해남-진도분지의 주요 지질은 북쪽에 소규모 분포하는 고생대 옥천누층군을 기저로 동쪽에 중생대 쥐라기의 대보 화강암체가 관입하였으며 이후 경상분지 내 백악기 후기 유천층군에 대비되는 화원층, 황산응회암 및 진도응회암 등이 분지 내에 광역

적으로 분포한다(Chang, 1975; Kang and Paik, 2012).

가사도광상 주변의 지질은 중생대 백악기 후기의 유천층군에 대비되는 화산쇄설성 퇴적암류와 이들을 관입한 석영안산암 및 중성 내지 염기성 암맥 등으로 구성되어 있다(Fig. 1).

화산쇄설성 퇴적암류는 응회각력암(tuff breccia)과 화산력응회암(lapilli tuff)으로 구성된다. 응회각력암은 가사도 남단 남쪽과 서쪽 해안선을 따라 분포하며, 화산력응회암은 가사도 남단 광상 지역에 광역적으로 분포하고 있다(Fig. 1). 응회각력암은 분급이 불량한 응회암질 암편, 석영안산암 암편, 화산력 크기의 부석편 및 석영, 장석의 결정편 등이 세립의 화산회 기질 내에 포함되어 있다. 화산력응회암은 일반적으로 응회암과 교호하며, 화산력은 거의 변질되어 점토화 또는 완전히 용해되어 형성된 공간을 석영과 탄산염광물 등이 2차적으로 충전하고 있다(Kim, 2001).

석영안산암은 가사도광상의 주맥 동쪽과 스파드맥(Spard vein) 부근에서 소규모로 분출하며 회녹색 내지 회색을 띠는 암석으로 화산쇄설성 퇴적암류 접촉부에서는 간혹 주변 모암을 포획하기도 한다. 석영안산암은 $\leq 0.1 \sim 0.7$ cm 크기의 장석과 석영이 반정을 이루는 반상조직을 보여준다(Kim, 2016). 주 구성 광물은 흑운모, 녹니석, 방해석 및 황철석 등이며, 견운모, 녹염석 및 갈철석 등이 소량 수반된다(Lee et al., 2000).

중성 내지 염기성 암맥은 가사도 남단 해안가에서 북서 방향으로 70 내지 200cm 폭으로 관입하여 등대맥을

Fig. 1. Geologic map of the Gasado deposit area (left side; modified from Kim, 2016) with simplified geologic map of Korea showing the location of the Gasado Au-Ag deposit (right side). Beach 1, 2 and 3 represent the location of Beach No. 1, Beach No. 2 and Beach No. 3 vein, respectively.

절단하고 있어 가사도 열수 맥상 광화작용 이후에 관입된 것임을 지시한다(Lee et al., 2000).

가사도 내에는 북동 방향의 선형구조가 가장 우세하며 다음으로 서북서 방향의 선형구조가 우세하게 발달하고 있으며, 북동 방향으로 발달하는 정단층 및 좌수향의 주향이동단층과 이에 수반된 이차단열이 발달하고 있다(Kim, 2016).

연구지역의 열수변질 광물인 견운모를 대상으로 한 $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ 연대측정 결과는 $70.1 \pm 2.1\text{Ma}$, $70.5 \pm 2.1\text{Ma}$ 로 보고된 바 있으며(Koh et al., 2000), 또한 K/Ar 연대측정을 통해 해남지역과 진도지역에 분포하는 응회암의 형성연대는 각기 $86.4 \sim 84.5\text{ Ma}$ 와 $76.3 \sim 73.9\text{ Ma}$ 로 보고된 바 있다(Kim and Nagao., 1992). 따라서 가사도광상은 백악기 후기의 화성활동에 의해 형성된 광상임을 알 수 있다(Kim, 2001).

3. 광 상

가사도광상은 백악기 후기 유천층군에 대비되는 화산쇄설성 퇴적암류 내의 열극을 충전하여 발달한 함 금·은 열수 맥상광상이다. 가사도 남부지역에 주맥(Main vein), 등대맥(Lighthouse vein), 등대동맥(Lighthouse East vein), 스파드맥(Spard vein), 스톡맥(Stock vein), 비치(Beach) 1, 2, 3호맥 등 다수의 맥상광체가 분포되어 있으며(Sennitt, 1995; Fig. 1), 금번 연구에서는 2020년 주 개발광체인 주맥을 대상으로 연구를 진행하였다.

가사도광상 주맥의 주향과 경사는 주로 $N10^\circ \sim 20^\circ E$, $70^\circ \sim 85^\circ NW$ 이나, 남서쪽으로 연장될수록 맥의 경사는

거의 수직에서 $75^\circ \sim 80^\circ SE$ 로 역전되는 양상을 보여준다. 맥폭은 $\leq 10\text{cm}$ 에서 $\geq 100\text{cm}$ 로 팽창 변화가 심하며, 연장은 $\geq 750\text{m}$ 로 확인된다. 판상맥과 망상맥 및 세맥 상의 특성을 보여주며(Fig. 2), 맥상 석영의 산출 특성 및 황화광물의 함유 여부와 함유량 등에 따라 백색, 유백색 및 회백색 등 다양한 색상을 보여준다(Fig. 3). 이들 맥상광체는 주로 괴상의 석영맥으로 부분적으로 각력상조직 및 정동조직과 함께 미정질조직(microcrystalline texture), 빗살조직(comb texture), 블레디드조직(bladed texture), 호상조직(crustiform texture), 칼세도니조직(chalcedonic texture) 및 콜로폼조직(colloform texture) 등이 발달하여 복합적인 조직 특성을 보인다(Fig. 3). 이러한 조직들은 천열수 맥상광상의 대표적인 조직 특성이다(Guoyi et al., 1995; Noel and Jeffery, 1995).

Fig. 2. Photographs of the Au-Ag bearing hydrothermal simple vein outcrops (A) and branching or anastomosing vein (B) at the Gasado deposit.

Fig. 3. Photographs of the products of hydrothermal mineralization at the Gasado Au-Ag deposit. Scale bar represents 1cm. A: colloform and chalcedony texture, B: chalcedony texture, C: drusy texture. Abbreviations: py=pyrite, py+sl+gn=pyrite+sphalerite+galena, qtz=quartz.

4. 광물 및 공생관계

가사도광상의 광화작용은 구조운동(tectonic break)에 의하여 광화 I기(stage I)와 광화 II기(stage II)로 구분된다. 광화 I기는 함 금·은 열수 광화작용이 석영맥의 생성과 함께 진행된 주 광화시기로서, 주요 함 금·은 광물 및 함 은 광물과 함께 천금속 황화광물 등이 산출한다. 광화 II기는 함 금·은 열수 맥상 광화작용이 진행된 이후 발생한 구조운동에 의하여 형성된 균열부에 방해석맥이 생성된 시기로 금속 광화작용이 이루어지지 않은 시기이다(Fig. 4).

광화 I기: 광화 1기는 산출하는 광물의 공생관계와 조합 특성 등에 의하여 3개의 세부 광화시기(초기, 중기, 후기)로 구분된다(Fig. 4). 가사도광상 광화 1기의 초기에는 주로 황철석, 자류철석, 황동석 등의 황화광물이 산출한다. 광화 1기 중기는 주된 함 금·은 광화작용이 광화 1기의 초기 말부터 계속하여 진행된 시기이다. 주된 함 금·은 광물인 에렉트럼과 함께 황동석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물이 산출되며, 우요텐보가르타이트(Uyttenbogaardite; Ag_3AuS_2)가 소량 수반되어 산출된다. 광화 1기의 후기에는 함 은 광물인 휘은석(Argentite; Ag_2S)이 소량의 레나이트(Lenaite; $AgFeS_2$) 및 자연은(Native Silver: Ag) 등을 수반하여 산출한다(Fig. 5).

황철석은 주로 초기 산출한 맥상 석영과 함께 석영맥 내 산점상으로 산출하거나 자형 내지 반자형의 입자들이 모여 괴상으로 산출한다(Fig. 5). 괴상으로 산출하는 황

철석 내에는 부분적으로 자류철석, 황동석, 에렉트럼, 섬아연석 및 휘은석 등이 포획되거나 균열부를 충전한 형태로 산출한다(Fig. 5).

자류철석은 주로 타형으로 산출하며, 황철석과 부분적으로 공생관계를 보이거나 황철석 내부 균열부를 충전하여 산출한다(Fig. 5A). 초기 말에 정출된 자류철석은 황동석과 밀접한 공생관계를 보이며 반자형으로 산출한다.

황동석은 황철석 입자의 외각부 또는 내부 균열부 등을 충전하거나 교대하여 괴상으로 산출한다(Figs. 5A, 5C and 5E). 일부 타형의 황동석 내에는 황철석, 에렉트럼 및 방연석 등이 포획된 형태로 산출된다.

가사도광상의 주된 함 금·은 광석광물인 에렉트럼은 광화 I기 초기 말부터 후기 초에 걸쳐 산출되었다. 광화 I기 초기 말에 산출된 초기 에렉트럼은 주로 황철석 내부에 포획되어 산출한다(Fig. 5C). 광화 I기 중기에 산출된 에렉트럼은 주로 황철석 및 황동석의 균열부 또는 두 광물 사이를 따라 충전하여 산출하거나(Fig. 5B) 황동석 내부에 포획되어 산출하며, 부분적으로 황동석, 우요텐보가르타이트 등과 공생관계를 이루며 황철석 내부에 산출한다(Fig. 5C). 광화 I기 중기 말부터 후기 초에 걸쳐 산출된 후기 에렉트럼은 주로 황철석 입자 외부를 교대하거나 내부 균열부를 충전하여 산출하며, 부분적으로 휘은석에 의하여 교대된다(Figs. 5B and 5D). 에렉트럼에 대한 전자현미분석(EPMA) 결과, 에렉트럼의 화학조성은 50.6~20.0 atomic % Au로 광화작용이 진행됨에 따라 Au의 함량은 감소하는 것으로 확인된다(Table 1).

섬아연석은 광화 I기 초기 말부터 후기 초에 걸쳐 침전이 이루어졌으며, 주로 황동석과 공생관계(rows of blebs)를 이루며 산출되거나 황동석 내부 균열부 및 입자 사이를 충전하여 산출된다. 후기의 섬아연석은 황철석 내부 균열부를 충전 및 교대하여 산출된다. 섬아연석에 대한 전자현미분석(EPMA) 결과, 초기 광화작용에서 후기로 갈수록 FeS 함량이 감소(7.0 to 0.7 mole % FeS)하는 경향을 보여주며(Table 2), 황동석과 공생관계를 이루며 산출하는 섬아연석의 경우 중심부에서 외부로 FeS 함량이 감소(6.4 to 2.4 mole % FeS)하는 화학성분 상의 누대구조를 보여준다.

우요텐보가르타이트는 주로 황철석 내부 균열부를 충전하여 산출하며, 부분적으로 황동석 또는 에렉트럼과 밀접한 공생관계를 이루며 산출된다(Fig. 5C).

방연석은 주로 황동석 또는 섬아연석 내부의 균열부를 교대하여 산출한다.

함 은 광물인 휘은석, 레나이트, 자연은 등은 광화 1기 후기에 산출한다. 휘은석은 주로 황철석 내부 균열부 또는 입자의 외각부를 충전하거나 교대하여 산출한다(Figs. 5B,

Fig. 4. Vein mineral paragenesis of the Gasado Au-Ag deposit.

Fig. 5. Photomicrographs of mineral occurrence and assemblages at the Gasado Au-Ag deposit. For descriptions of each photograph, refer to the text. Scale bar represents 20 μ m. Abbreviations: Arg=argentite, Cp=chalcocopyrite, El=electrum, Native Ag=native silver, Po=pyrrhotite, Py=pyrite, Sl=sphalerite, Uy=Uytendogaardite.

5D, 5E and 5F). 레나이트는 주로 황철석 내부 균열부를 따라 충전하여 산출한다. 자연은은 황철석 가장자리 공간들을 충전한 휘은석과 밀접한 공생관계를 이루며 산출하거나, 황철석 입자 사이 또는 외부 균열부를 따라 충전하여 산출하기도 한다(Fig. 5F).

5. 함 금은 광화작용의 지화학적 생성환경

가사도광상 주 광화시기인 광화 1기의 함 금은 광화작용에 대한 온도 및 황 분압(sulfur fugacity: fS_2)조건의 규명을 위하여 산출하는 광석광물의 공생관계 및 Fe-S계, Fe-Zn-S계(Scott and Barnes, 1971), Au-Ag-S계(Barton and Toulmin, 1964; Craig and Barton, 1973)의 조성 변

화를 활용하였으며, 그 결과는 Fig. 6에 제시하였다.

황철석-자류철석의 산출로 시작된 가사도 열수광체의 광화 1기 함 금은 광화작용은 초기: 황철석-에렉트럼-섬아연석 → 중기: 에렉트럼-섬아연석-휘은석 → 후기: 휘은석-자연은은의 광물조합과 공생관계를 보이며 진행되었다. 이러한 광물 조합과 공생관계 및 초기에 산출하는 에렉트럼(49.4~70.0 atomic % Ag) 및 섬아연석의 화학조성(약 7.0~3.0 mole % FeS) 등을 활용한 초기 함 금은 광화작용 시 온도 조건은 $\geq 290^\circ\text{C}$ 에서 약 205°C 이었으며, 황 분압 조건은 $\leq 10^{-10.1}$ 내지 $\geq 10^{-14.2}$ atm이었다. 중기의 함 금은 광화작용은 광물조합(에렉트럼-섬아연석-휘은석) 및 에렉트럼(70.0~80.0 atomic % Ag)과 섬아연석의 화학조성(약 3.0~0.7 mole % FeS)을 이용하여 규

Table 1. Representative chemical composition of electrum from the Gasado Au-Ag deposit

Sample no.	Weight %				Atomic %			Remarks*
	Au	Ag	S	Total	Au	Ag	Ag/Au	
GSD-151-6-1	52.90	45.83	0.00	98.7	38.7	61.3	1.58	Early
GSD-151-7-1	48.50	49.33	0.00	97.8	35.0	65.0	1.86	Early
GSD-151-7-2	41.88	54.90	0.00	96.8	29.5	70.5	2.39	Early
GSD-151-8-1	58.73	39.61	0.00	98.3	44.8	55.2	1.23	Early
GSD-151-8-3	54.52	43.79	0.00	98.3	40.5	59.5	1.47	Early
GSD-152-4-2	55.62	43.09	0.00	98.7	41.4	58.6	1.41	Early
GSD-152-7-1	52.58	45.91	0.00	98.5	38.5	61.5	1.59	Early
GSD-152-7-2	50.58	47.84	0.45	98.9	36.7	63.3	1.73	Early
GSD-182-2-1	31.02	67.97	0.53	99.5	20.0	80.0	4.00	Middle
GSD-182-5-1	36.56	61.70	0.92	99.2	24.5	75.5	3.08	Middle
GSD-192-1-1	48.63	51.37	0.00	100.0	34.1	65.9	1.93	Early
GSD-193-1-2	48.05	50.48	0.00	98.5	34.3	65.7	1.92	Early
GSD-193-2-1	23.15	75.59	0.71	99.4	14.4	85.6	5.96	Middle
GSD-193-2-2	39.31	58.45	1.11	98.9	26.9	73.1	2.72	Middle
GSD-193-2-4	41.93	57.57	0.00	99.5	28.5	71.5	2.51	Middle
GSD-193-2-5	43.61	54.65	0.00	98.3	30.4	69.6	2.29	Middle
GSD-193-3-1	28.90	70.14	0.00	99.0	18.4	81.6	4.43	Middle
GSD-193-4-3	33.63	66.37	0.00	100.0	21.7	78.3	3.60	Middle
GSD-193-4	41.31	56.02	1.46	98.8	28.8	71.2	2.48	Middle
GSD-193-5	37.48	62.28	0.00	99.8	24.8	75.2	3.03	Middle
GSD-193-8-1	36.77	62.31	0.00	99.1	24.4	75.6	3.09	Middle
GSD-251-1-1	43.29	55.29	0.00	98.6	30.0	70.0	2.33	Early
GSD-251-2-1	61.86	37.18	0.00	99.0	47.7	52.3	1.10	Early
GSD-251-2-2	55.75	42.91	0.00	98.7	41.6	58.4	1.41	Early
GSD-251-4-1	64.41	34.47	0.00	98.9	50.6	49.4	0.98	Early
GSD-251-5-1	53.58	44.66	0.00	98.2	39.7	60.3	1.52	Early
GSD-251-5-2	63.80	34.46	0.00	98.3	50.3	49.7	0.99	Early
GSD-252-1-1	51.91	46.97	0.00	98.9	37.7	62.3	1.65	Early
GSD-252-2-1	62.31	36.51	0.00	98.8	48.3	51.7	1.07	Early
GSD-252-3-1	64.43	34.80	0.00	99.2	50.3	49.7	0.99	Early
GSD-252-4-1	43.09	55.34	0.00	98.4	29.9	70.1	2.35	Early
GSD-253-1-1	33.37	64.93	0.00	98.3	22.0	78.0	3.55	Middle
GSD-253-1-5	43.93	54.35	0.00	98.3	30.7	69.3	2.26	Middle
GSD-253-2-1	43.72	55.65	0.00	99.4	30.1	69.9	2.32	Middle
GSD-253-3-1	36.34	62.01	0.00	98.4	24.3	75.7	3.12	Middle

*Substages of stage I.

Table 2. Representative chemical composition of sphalerite from the Gasado Au-Ag deposit

Sample No.	Weight %					Mole %		Remark*
	Zn	Fe	Mn	S	Total	ZnS	FeS	
GSD-151-1-1	65.9	0.9	0.0	33.2	100.0	98.4	1.6	Middle
GSD-151-1-2	63.9	1.1	0.0	34.4	99.4	98.0	2.0	Middle
GSD-151-1-3	63.1	1.5	0.0	34.5	99.2	97.2	2.8	Middle
GSD-151-5-2	62.5	2.0	0.0	35.5	100.0	96.5	3.5	Early
GSD-151-6-2	62.8	2.0	0.0	35.2	100.0	96.3	3.7	Early
GSD-151-7-3	63.6	0.7	0.0	34.9	99.2	98.8	1.2	Middle
GSD-151-7-6	62.0	1.0	0.0	37.0	100.0	98.1	1.9	Middle
GSD-151-7-7	64.1	0.8	0.0	35.1	100.0	98.5	1.5	Middle
GSD-151-8-2	62.6	2.2	0.0	34.5	99.3	96.0	4.0	Early
GSD-151-8-4	62.6	2.0	0.0	34.2	98.8	96.5	3.5	Early
GSD-151-9-1	64.4	1.2	0.0	34.4	100.0	97.8	2.2	Middle
GSD-152-4-1	64.3	0.6	0.0	35.1	100.0	98.8	1.2	Middle
GSD-192-3-2	61.7	1.5	0.0	35.5	98.7	97.3	2.7	Middle
GSD-193-1-4	64.6	0.9	0.0	33.9	99.3	98.5	1.5	Middle
GSD-193-4-4	64.9	0.4	0.4	33.6	99.4	98.5	0.7	Middle
GSD-193-8-2	63.5	2.6	0.0	33.9	100.0	95.5	4.5	Early
GSD-252-5-2	62.1	2.4	0.7	34.8	100.0	94.6	4.2	Early
GSD-253-1-2	60.6	3.9	0.0	35.5	100.0	93.0	7.0	Early
GSD-253-1-3	62.5	3.9	0.0	33.5	100.0	93.1	6.9	Early
GSD-253-2-2	61.7	3.6	0.0	34.7	100.0	93.6	6.4	Early
GSD-271-1-2	57.1	2.0	0.0	40.9	100.0	96.1	3.9	Early

*Substages of stage I.

Fig. 6. Sulfur fugacity versus temperature diagram for Au-Ag mineralization of stage I at the Gasado Au-Ag deposit with sulfidation reactions. Abbreviations: Ag= native silver, arg=argentite, py=pyrite, po=pyrrhotite.

명된 온도와 황 분압 조건인 약 $205^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$, 약 $10^{-14.2} \sim 10^{-18.5}$ atm의 환경에서 진행되었다. 휘은석과 자연은의 산출로 특징지어지는 광화 1기 후기 광화작용의 온도 및 황 분압 조건은 Ag-S계(휘은석/자연은) 상평형 조건

을 따라 $\leq 205^{\circ}\text{C}$, $\leq 10^{-18.5}$ atm으로 확인되었다(Fig. 6).

가사도 함 금·은 열수광화작용과 관련된 광화작용 시의 온도 조건과 열수유체의 진화과정은 Choi(1999)와 Kim et al.(2002) 등이 유체포유물 연구를 통하여 제시한 바 있다. 이들 결과를 요약하면 다음과 같다. 가사도광상의 금·은 광화작용과 관련된 맥상 석영시료를 대상으로 수행된 유체포유물 연구 결과, 상온($\approx 20^{\circ}\text{C}$)에서의 상(phase) 관계를 기초로 Type I 유체포유물(aqueous; liquid-rich inclusions)만이 관찰되었다. 가사도광상 광화 1기 맥상 석영의 유체포유물 균일화온도 범위는 약 $253 \sim 158^{\circ}\text{C}$ 이며, 염 농도 범위는 약 3.5~1.7 equiv. wt. % NaCl으로 확인된다(Choi, 1999; Kim et al., 2002). 따라서 가사도광상 함 금·은 광화작용은 3.5~1.7 wt. % 상당 염농도를 갖는 열수계에서 약 $\geq 253 \sim \leq 158^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건에서 진행되었다. 비등현상을 지시하는 기상으로 균일화되는 유체포유물이 관찰되지 않는 점으로 미루어 가사도 열수계는 냉각과 천수 유입 등에 의하여 진화되었으며, 이러한 진화과정과 관련된 온도 감소에 의하여 광화작용이 진행되었다. 이러한 유체포유물 연구 결과는 금변 광물학적·열

역학적 연구에 의하여 규명하여 제시된 금-은 광화작용의 온도 조건과 유사하다.

6. 결 론

가사도광상은 해남-진도분지 내 백악기 후기 유천층군에 대비되는 화산쇄설성 퇴적암류에 발달한 열극을 충진하여 생성된 함 금·은 열수 맥상광상이다. 각력상 및 정동조직과 함께 부분적인 미정질조직, 빗살조직, 블레디드 조직, 호상조직, 칼세도니조직 및 콜로폼조직 등 천열수 광상의 조직 특성을 보여주는 함 금·은 열수 맥상광체이다.

가사도광상의 광화작용은 구조운동에 의하여 함 금·은 열수 광화작용이 진행된 광화 I기와 금속 광화작용이 진행되지 않은 방해석맥의 생성 시기인 광화 II기로 구분된다. 황철석-자류철석의 산출로 시작된 광화 I기 함 금·은 광화작용은 초기: 황철석-에렉트럼-섬아연석 → 중기: 에렉트럼-섬아연석-휘은석 → 후기: 휘은석-자연은의 광물 조합과 공생관계를 보이며 진행되었다.

광물학적 연구 등에 의하여 도출된 결과에 의하면, 가사도광상의 주된 금·은 광화작용은 약 $290^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건에서 열수계의 온도 감소에 의하여 진행되었으며, 이때의 황 분압 조건은 $\approx 10^{-10.1} \sim 10^{-18.5} \text{ atm}$ 이었다.

이러한 가사도광상의 광상·광물학적 특성, 지화학적 환경변화 및 열수계의 온도 조건 등은 가사도 함 금·은 광상이 천부 환경에서 생성된 저유황형 천열수 맥상광상임을 지시한다.

사 사

이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2020)지원을 받아 작성되었음. 본 논문을 세심하게 검토하여 고견을 주신 익명의 심사자들에게 진심으로 감사드립니다.

References

- Barton, P.B., Jr and Toulmin, P., III. (1964) The electrom-tarnish method for determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.28, p.619-640. doi: 10.1016/0016-7037(64)90082-1
- Chang, K.H. (1975) Cretaceous stratigraphy of South Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.11, p.1-23.
- Cho, D.L. and Kwon, S.T. (1994) Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of crustal thickness. *J. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.41-61.
- Choi, S.G., Pak, S.J., Choi, S.H. and Shin, H.J. (2001) Mesozoic Granitoids and Associated Gold-Silver Mineralization in Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.34, p.25-38.
- Choi, S.G., Pak, S.J., Kim, S.W., Kim, C.S. and Oh, C.W. (2006) Mesozoic Gold-Silver Mineralization in South Korea: Metallogenic Provinces Reestimated to the Geodynamic Setting. *Econ. Environ. Geol.*, v.39, p.567-581.
- Choi, S.H. (1999) A modelling of gold-silver deposits in Korea. Korea Mining Promotion Corporation, 1999-2, 92p.
- Craig, J.R. and Barton, P.B. Jr (1973) Thermochemical approximations for sulfosalts. *Econ. Geol.*, v.68, p.498-506. doi: 10.2113/gsecongeo.68.4.493
- Guoyi, D., Gregg, M. and Subhash, J. (1995) Quartz Textures in Epithermal veins, Queensland - Classification, Origin and Implication. *Econ. Geol.*, v.90, p.1841-1856.
- James, F.R. II. (2020) Mineral Commodity Summaries, p.71-151.
- Kang, H.C. and Paik, I.S. (2012) Review on the geological ages of the formations in the Gyeongsang Basin, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.49, p.17-29.
- Kang, H.S. (1998) Technical survey report of the Gasado mine. Korea Mining Promotion Corporation, p. 1-24.
- Kim, C.S. (2001) Hydrothermal alteration and associated mineralization in the Gasado volcanic-hosted gold-silver deposit. MS. Thesis. Korea Univ, Korea, 78p.
- Kim, C.S., Choi, S.G., Choi, S.H. and Lee, I.W. (2002) Hydrothermal alteration and its genetic implication in the Gasado volcanic-hosted epithermal gold-silver deposit: use in exploration. *J. Miner. Soc. Korea*, v.15, p.205-220.
- Kim, I.J. and Nagao, K. (1992) K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.1, p.58-70.
- Kim, T.H. (2016) Interpretations of the Geological Structures and Characteristics of the Hydrothermal Quartz Vein in Gasa islands, SW Korea. MS.Thesis. Pukyong National Univ, Korea, 65p.
- Koh, S.M., Tetsuichi, T., Kim, M.Y., Kazuki, N., Hong, S.S. and Sadahisa, S. (2000) Geological and Geochemical Characteristics of the Hydrothermal Clay Alteration in South Korea. *Resources Geol.*, v.50, p.229-242. doi: 10.1111/j.1751-3928.2000.tb00072.x
- Lee, I.W., Kim, R.H., Kim, M.S. and Kim, S.T. (2000) A detailed geological survey report (Gold, Jindo area). Korea Mining Promotion Corporation, p.4-10.
- Noel, C.W. and Jeffrey, W.H. (1995) Epithermal Gold deposits; styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, no.23, p.1-13. doi: 10.5382/SEGnews.1995-23.fea
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Econ. Geol.*, v.66, p.653-669. doi: 10.2113/gsecongeo.66.4.653
- Sennitt, C.M. (1995) Geological assessment, Gasado island, Republic of south Korea. Indochina Goldfields Limited, 78p.
- Tsue, A., Mizuta, T., Watanabe, M. and Min, K.G. (1981) Jurassic and Cretaceous granitic rocks in South Korea. *Mining Geol.*, v.31, p.260-280. doi: 10.11456/shingenchishitsu1951.31.261